

# MÉTODOS DE ECUALIZACIÓN DE LA GANANCIA DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS DE FIBRA DOPADA CON ERBIO

Paula de Benito, Silvia Abad, Carmen Vázquez\* y Manuel López-Amo  
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Pública de Navarra  
E-31006 Pamplona, España e-mail: [mla@unavarra.es](mailto:mla@unavarra.es)

\* Universidad Carlos III de Madrid. Dpto. Tecnología Electrónica. Escuela Politécnica Superior. C/ Butarque, 15. 28911 Leganés, Madrid

**Área de interés:** Fibras ópticas: Tecnología de fibras y cables, dispositivos pasivos y activos, amplificadores.

**Palabras clave:** Amplificadores ópticos, Ecualización.

## 1.- Introducción.

La ecualización de la ganancia en amplificadores ópticos es crítica para el caso de sistemas de comunicaciones ópticas multicanal en los que interesa que los canales (multiplexados en diferentes longitudes de onda, es decir, sistemas WDM) se amplifiquen por igual.

Se presenta en este trabajo un estudio comparativo experimental de las posibles técnicas de ecualización en amplificadores ópticos de fibra dopada tanto de sílice como de ZBLAN y configuraciones compuestas de ambos. Se analizan la mejores opciones en cuanto a ancho de banda y relación señal a ruido para diferentes potencias ópticas de entrada. No forman parte de este estudio las configuraciones que incluyen filtros en longitud de onda específicamente diseñados para aplanar la ganancia.

## 2. Métodos de ecualización de la ganancia del EDFA

Los máximos y los mínimos que presenta la curva de ganancia del EDFA (amplificadores de fibra óptica dopada con Erblio) cuya diferencia puede llegar a veces hasta a 5dB, pueden suponer graves problemas de diseño para los sistemas que utilizan multiplexación en longitud de onda (sistemas WDM). En comparación con amplificadores diseñados para amplificar una única longitud de onda, los sistemas con múltiples portadoras ópticas necesitan prestaciones adicionales. Así, es importante la ecualización de la ganancia a lo largo de la banda amplificadora, es decir, conseguir que la curva de ganancia sea lo más plana posible.

Una diferencia de ganancia de tan sólo 0.36dB entre canales en un amplificador, puede traducirse en 10dB de diferencia tras su paso por 27 etapas amplificadoras en un enlace de larga distancia. Esta degradación de potencia puede hacer insuficiente la calidad de los canales menos favorecidos. Para conseguir la

ecualización en longitud de onda se utilizan varios métodos.

En este trabajo se estudian varios métodos de ecualización del espectro de ganancia del EDFA:

### 2.a. Amplificador de Fibra Fluorada Dopada con Erblio

Para conseguir bandas de amplificación más anchas y planas que en los amplificadores convencionales de fibra de sílice, una de las mejores opciones es reemplazar el material base de las fibras dopadas, habitualmente sílice, por compuestos fluorados de tipo ZBLAN [1]. Un sistema cristalino típico de este tipo de fibras podría ser:  $ZrF_4-BaF_2-LaF_3-YF_3-AlF_3-LiF-NaF$ . La configuración de este tipo de amplificadores, EDFFAs (Erbium Doped Fluoride Fiber Amplifiers), no difiere apenas de la utilizada en los EDFA convencionales, aunque en este caso el bombeo puede realizarse de manera eficiente únicamente en 1480nm, por lo que las figuras de ruido resultantes suelen ser mayores.

No obstante, hay que resaltar que las fibras fluoradas son frágiles, difíciles de soldar a las fibras estándar de sílice, de precio elevado y sensibles a la humedad.

El amplificador de fibra fluorada dopada con erblio (EDFFA) realizado se muestra en la figura 1. En pruebas preliminares para la elección de la configuración del amplificador, se estudió la diferencia de absorción de bombeo entre las dos configuraciones posibles: contradireccional y codireccional, resultando mucho más eficiente la configuración contradireccional que apenas presenta bombeo residual, es decir, la fibra absorbe de manera eficiente el bombeo suministrado. Es por ello que se decide su uso en la configuración definitiva del amplificador.

El amplificador óptico consta de una fibra fluorada, un aislador óptico, un multiplexador por división en longitud de onda (WDM) y un láser de bombeo a 1480nm. El aislador soldado a un extremo de la fibra fluorada protege al láser sintonizable (TLD) del bombeo residual (no absorbido por la fibra).

La gráfica 1 nos da una idea inicial de la respuesta de amplificador. En ella se observa que el ancho de banda de amplificación se ha trasladado hacia longitudes de onda superiores.

También se comprueba que el pico en torno a 1530nm obtenido con el EDFA, se ha trasladado a longitudes de onda en torno a 1560nm.

Los resultados obtenidos se mostrarán al final de este trabajo comparando los de todos los amplificadores entre sí.

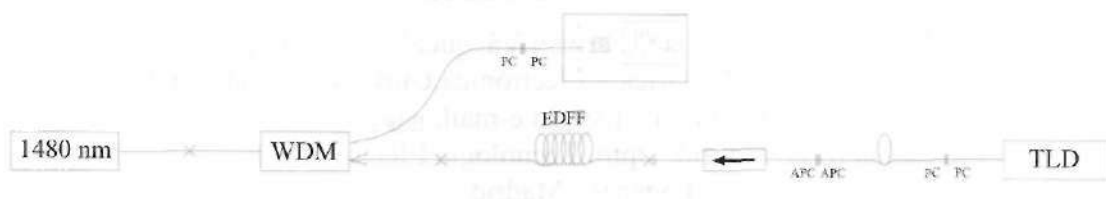


Fig. 1 Configuración del Amplificador de Fibra Fluorada Dopada con Erblio (EDFFA)

Todas las medidas tomadas con el analizador de espectros ópticos (OSA) se han realizado con un ancho de banda de resolución 0.2nm y una sensibilidad de -75dBm.

## 2.b. Amplificador de fibra de sílice dopada con Erblio con una línea láser estabilizadora

En este apartado se analiza un método recientemente publicado[4] de ecualización de amplificadores que se consigue mediante la inclusión de una línea láser en el amplificador que se deja estabilizada en una longitud de onda y una potencia previamente seleccionadas.

Para la implementación experimental se utilizará un láser sintonizable conectado al EDFA mediante un acoplador 50:50. La salida del EDFA se conecta al OSA, del cual se extraen las gráficas que se mostrarán a lo largo del apartado. El montaje se muestra en la figura 2.

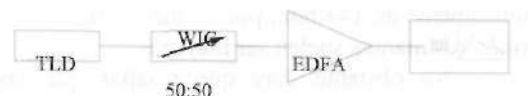


Fig. 2 Configuración del Amplificador de Fibra Dopada con Erblio con una línea láser adicional

En primer lugar, se busca la longitud de onda y la potencia de emisión óptimas que se deberán introducir mediante un láser estabilizador, para conseguir el máximo "aplanamiento" de la curva ganancia. Para ello, se realizan barridos en longitud de onda y en potencia con otro láser sintonizable buscando la longitud de onda para la cual se obtiene una curva de ruido ASE más plana. Como se verá, se concluye que 1532nm es la longitud de onda óptima.

## 2.c. Amplificadores híbridos [2].

### 2.c.a. Amplificadores híbridos en cascada

Recientemente se ha descubierto que la ganancia plana multicanal podría resultar distorsionada por los diferentes perfiles de sección cruzada (cross section) de emisión y absorción cuando existe variación de temperatura en la fibra dopada con Erblio [3]. Para resolver este problema, se recomienda disponer en cascada fibras dopadas con erblio con diferente dependencia con la temperatura.

Para ello, en este apartado se probará el montaje de dos amplificadores híbridos compuestos por un EDFA y un EDFFA, colocados en las dos posibles posiciones (EDFA+EDFFA o EDFFA+EDFA).

Los experimentos de transmisión realizados han demostrado que las características de ganancia plana del EDFFA tienen ventajas prácticas. Sin embargo, el EDFFA no puede utilizar eficientemente el bombeo a 980nm. Este problema también se soluciona con esta configuración híbrida, a la que se le añade un aislador óptico entre ambos amplificadores para eliminar emisiones espontáneas amplificadas propagadas hacia atrás y para eliminar también el bombeo residual.

Se recomienda el uso del amplificador con mejor característica de figura de ruido (NF) en primera posición (al frente del amplificador híbrido). De los dos amplificadores de que se dispone, el que tiene mejor característica de figura de ruido es el EDFA convencional (como se ha visto en el método 1 en este mismo capítulo), por lo que en teoría, el amplificador híbrido EDFA+EDFFA deberá tener una característica de NF mejor que el otro amplificador híbrido con el EDFFA en primer lugar.

La primera configuración realizada es la conexión del EDFA en cascada con el EDFFA. El montaje utilizado se muestra en la figura 3.

Los resultados obtenidos se muestran en el apartado de resultados.

### 2.c.b. Amplificador híbrido en paralelo

Otro método para conseguir amplificadores ópticos de mayor ancho de banda y con espectro de ganancia más plano es la conexión de dos unidades amplificadoras en paralelo. De esta forma se busca conseguir unir las bandas de amplificación de dos amplificadores y así lograr una banda de amplificación más ancha. Por ello, se deben buscar amplificadores cuyas bandas de amplificación sean lo más planas posible y estén situadas en diferentes longitudes de onda como por ejemplo un amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) cuya banda de amplificación comprendería la franja de 1530nm a 1560nm, y un amplificador de fibra fluorada dopada con

erbio (EDFFA), cuya banda de amplificación comprendería la franja de 1560nm en adelante.

El montaje realizado se muestra en la figura 4. Se ha utilizado un acoplador 50:50 que introduce 3dB de pérdidas en la señal de salida que ya se han contabilizado y añadido en las gráficas de ruido ASE. La implementación óptima de este sistema pasaría por sustituir este acoplador por un WDM que separara las dos bandas de ganancia, introduciendo bajas pérdidas en la señal.

2. Resultados obtenidos y conclusiones

En este apartado se compararán los resultados obtenidos de ruido ASE, ganancia y figura de ruido con cada amplificador.

En la gráfica 1 se muestran los resultados de ruido ASE para cada uno de los

amplificadores con bombeos máximos: 90mW de potencia de bombeo para el EDFA (tanto individual como híbrido), 500mA de corriente de inyección para el EDFFA (tanto individual como híbrido) y 60mW de potencia para el caso del EDFA con línea láser adicional.

Se comprueba que los amplificadores híbridos son los que mayor ruido introducen en el sistema, mientras que el EDFA con línea láser estabilizadora es el amplificador menos ruidoso. Se comprueba también que la curva de ruido ASE del amplificador híbrido en paralelo está compuesta por la gráfica de ruido ASE del EDFA para la zona de 1530nm y por la gráfica de ruido ASE del EDFFA para la zona de 1560nm. Se trata de una curva más plana que la del EDFA al haberse añadido la componente de ruido para altas longitudes de onda.

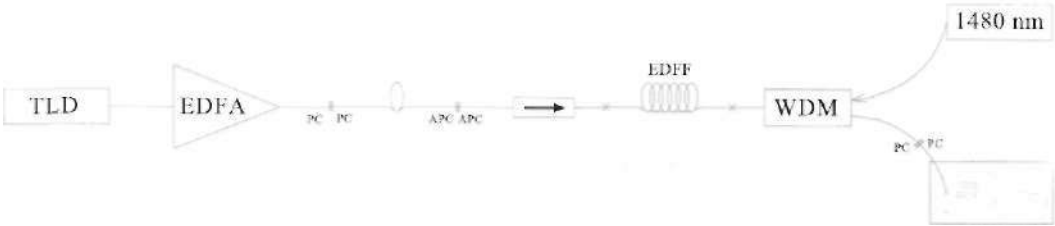


Fig. 3 Configuración del Amplificador híbrido compuesto por el EDFA en cascada con el EDFFA

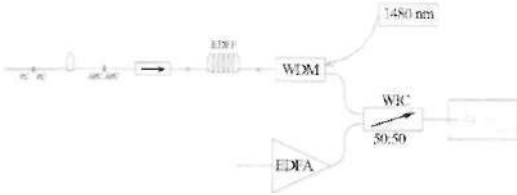
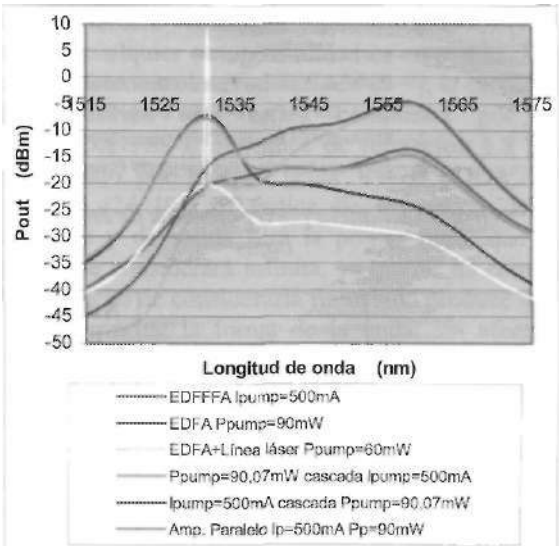


Fig. 4 Configuración del Amplificador híbrido compuesto por el EDFA en paralelo con el EDFFA

En la tabla 1 se muestran los anchos de banda de amplificación de los diferentes amplificadores estudiados para diferentes potencias de entrada. Se comprueba que los amplificadores híbridos en cascada tienen un ancho de banda (medido a 5.5dB) mucho mayor que el EDFA y el EDFFA, destacando los 49nm de ancho de banda conseguidos con el amplificador híbrido formado por el EDFA en cascada con el EDFFA. A continuación se muestran los espectros de ganancia para potencias de entrada medias ( $P_{in}=-20dBm$ , gráfica 2) y para potencias de entrada bajas ( $P_{in}=-40dBm$ , gráfica 3).

En la gráfica 2 se observa que cualquiera de los dos amplificadores híbridos tiene muy buena respuesta. Con el EDFA se consigue algo más de ganancia para longitudes de onda menores de 1540nm, sin embargo, este pico de ganancia puede convertirse en una gran diferencia de potencia tras varias etapas amplificadoras.

En lo referente a la figura de ruido de las diferentes configuraciones, la gráfica 4 muestra que cada una de las configuraciones híbridas en cascada tiene una figura de ruido fijada por el amplificador colocado en primera posición. Así

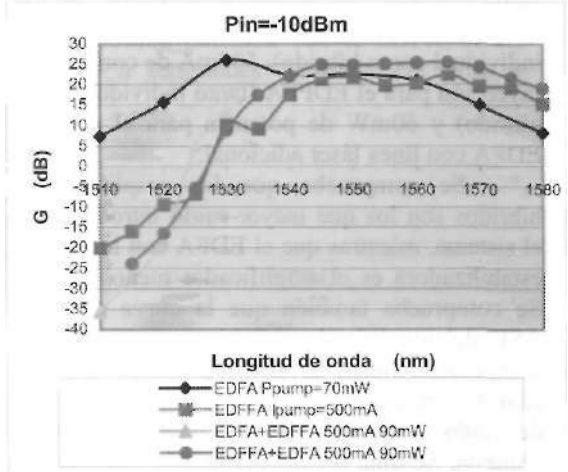


Gráfl Ruido ASE con potencias de bombeo máximas

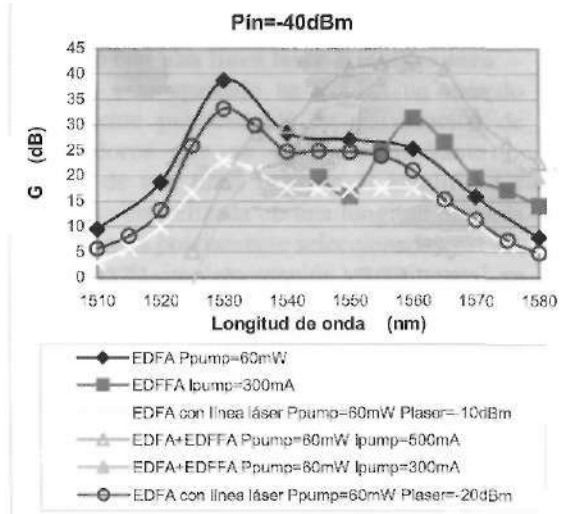
la configuración con el EDFA en primer lugar llega casi a los 5dB, similar al EDFA pero con potencias de bombeo superiores. Del mismo modo la segunda configuración en cascada tiene un figura de ruido bastante alta (similar al EDFFA).

Se concluye entonces que, para potencias de entrada medias se recomienda el uso del amplificador híbrido en cascada con el EDFA en primer lugar.

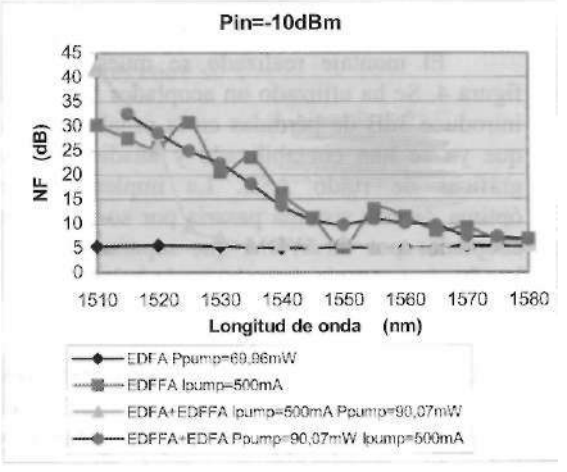
En la gráfica 3 se observa que el espectro más plano se consigue con el EDFA con una línea láser estabilizadora de -10dBm aunque se consiguen unos valores bastante bajos de ganancia entre 18 y 23dB. Se debe tomar un compromiso entre valores de ganancia y grado de aplanamiento.



Gráf.2 Ganancia para potencias de entrada medias



Gráf.3 Ganancia para potencias de entrada bajas



Gráf.4 Figura de Ruido para potencias de entrada bajas

El amplificador híbrido EDFA+EDFFA da más ganancia que el EDFA solo a longitudes de onda superiores. Este amplificador híbrido, también tiene una respuesta más plana que el EDFA.

De nuevo, el amplificador con peor respuesta es el EDFFA. Para potencias de entrada bajas y longitudes de onda bajas (alrededor de 1530nm) se recomienda el uso del amplificador con línea láser adicional. Pero para longitudes de onda superiores (alrededor de 1560nm) se recomienda el uso del amplificador híbrido en cascada EDFA+EDFFA, con el que se obtiene mayor ganancia que con el EDFA además de un mayor ancho de banda y una figura de ruido similar o algo menor.

3.- Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado a través del proyecto CICyT-TIC2001-0877-C02-02.

4. Bibliografía

- [1] Hirotaka Ono, Makoto Yamada, Terutoshi Kanamori, Shoichi Sudo, Yasutake Ohishi. "1.58-um Band Gain-Flattened Erbium Doped Fiber Amplifiers for WDM Transmissions Systems". Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, n° 3, (1999).
- [2] Makoto Yamada, y otros. "A Low-Noise and GainFlattened Amplifier Composed of a Silica-Based and a Fluoride-Based Er<sup>3+</sup>-Doped Fiber Amplifier in a Cascade Configuration" IEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, n°5(1996).
- [3] Ju Han Lee, Namkyoo Park. "Reduction of Temperature-Dependent Multichannel Gain Distortion Using a Hybrid Erbium-Doped Fiber Cascade". IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, n° 8 (1998).
- [4] Shinji Yamashita, Masato Nishihara. "L-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Incorporating an Inline Grating Láser". IEEE Journal on Selected Topics in quantum Electronics, v.7, n°1. (2001)

		Ancho de banda
<b>Pin=-40dBm</b>  <b>(BW a 9dB de caída)</b>	<b>EDFA</b>	35 nm
	<b>EDFFA</b>	10 nm
	<b>EDFA+láser(-10)</b>	38 nm
	<b>EDFA+láser(-20)</b>	33 nm
	<b>EDFA+EDFFA (bombeo máx.)</b>	27 nm
	<b>EDFA+EDFFA (bombeo med.)</b>	22 nm
<b>Pin=-10dBm</b>  <b>(BW a 5.5dB de caída)</b>	<b>EDFA</b>	35 nm
	<b>EDFFA</b>	33 nm
	<b>EDFA+EDFFA (máx)</b>	49 nm
	<b>EDFFA+EDFA (máx)</b>	40 nm
<b>Pin=+5dBm</b>  <b>(BW a 0.5dB de caída)</b>	<b>EDFA</b>	35 nm
	<b>EDFFA</b>	38nm (mínimo)
	<b>EDFA+EDFFA (máx)</b>	40nm (mínimo)
	<b>EDFFA+EDFA (máx)</b>	40nm (mínimo)

Tabla 1: Comparación de anchos de banda